

PERBANDINGAN EFIKASI, KEAMANAN, DAN EFISIENSI *PULSED FIELD ABLATION* (PFA) DAN *THERMAL ABLATION* PADA PASIEN FIBRILASI ATRIUM : TINJAUAN LITERATUR

Ahmad Fauzan Hafizh^{1*}, Iswandi Darwis², Wiwi Febriani³, Pieter Saragih⁴

Fakultas Kedokteran Universitas Lampung^{1,2,3}, Bagian Penyakit Dalam RSUD Dr. H. Abdul Moeloek Provinsi Lampung⁴

*Corresponding Author : afauzanhafizh@gmail.com

ABSTRAK

Fibrilasi atrium (*Atrial Fibrillation*, AF) merupakan aritmia supraventrikular yang paling umum ditemui dalam praktik klinis dan memiliki risiko komplikasi serius seperti stroke dan gagal jantung. Terapi ablasi kateter telah menjadi pendekatan utama untuk kontrol irama pada pasien dengan AF yang tidak respons terhadap terapi farmakologis. Ablasi termal konvensional, seperti *radiofrequency ablation* (RFA) dan *cryoballoon ablation* (CBA), telah digunakan secara luas namun memiliki keterbatasan terkait risiko cedera pada struktur nontarget. *Pulsed field ablation* (PFA) hadir sebagai teknologi baru dengan profil keamanan yang lebih baik berkat mekanisme nontermal nya. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk membandingkan efikasi, keamanan, dan efisiensi PFA dengan ablasi termal berdasarkan data dari studi klinis yang relevan. Tinjauan literatur ini menggunakan metode *narrative review* dengan meninjau studi dari hasil penelusuran pada 3 *database* utama yaitu PubMed, ScienceDirect, dan MDPI dengan rentang studi 5 tahun terakhir. Berdasarkan hasil penelusuran, didapatkan 5 artikel yang relevan. Hasil studi menunjukkan bahwa PFA noninferior dibandingkan ablasi termal dalam hal keberhasilan mempertahankan irama sinus jangka panjang, dan dalam beberapa studi menunjukkan hasil yang superior. PFA juga menunjukkan keunggulan dalam efisiensi prosedur dan profil keamanan, khususnya dalam menurunkan komplikasi neurologis dan kerusakan struktur sekitar atrium. Meskipun demikian, data jangka panjang dan studi dari populasi negara berkembang masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi manfaat jangka panjang dan implementasi PFA secara lebih luas di berbagai sistem layanan kesehatan.

Kata kunci : ablasi termal, fibrilasi atrium, *pulsed field ablation*

ABSTRACT

Atrial fibrillation (AF) is the most common supraventricular arrhythmia encountered in clinical practice and carries a risk of serious complications such as stroke and heart failure. Catheter ablation therapy has become a main approach for rhythm control in patients with AF who do not respond to pharmacological therapy. Conventional thermal ablation, such as radiofrequency ablation (RFA) and cryoballoon ablation (CBA), has been widely used but carries the risk of injury to non-target structures. Pulsed field ablation (PFA) has emerged as a new technology with a better safety profile due to its non-thermal mechanism. This literature review aims to compare the efficacy, safety, and efficiency of PFA with thermal ablation based on data from relevant clinical studies. The review used a narrative review method by analyzing studies retrieved from three main databases: PubMed, ScienceDirect, and MDPI, within the last five years. Five relevant articles were identified. The results show that PFA is non-inferior to thermal ablation in maintaining long-term sinus rhythm, with some studies showing superior outcomes. PFA also demonstrates advantages in procedural efficiency and safety, particularly in reducing neurological complications and damage to surrounding atrial structures. However, long-term data and studies from developing countries remain limited. Therefore, further research is needed to evaluate the long-term benefits and broader implementation of PFA in various healthcare systems.

Keywords : atrial fibrillation, *pulsed field ablation*, thermal ablation

PENDAHULUAN

Fibrilasi atrium (*Atrial Fibrillation*, AF) merupakan suatu jenis aritmia supraventrikular yang ditandai oleh aktivitas listrik atrium yang ireguler dan cepat sehingga kontraksi atrium

menjadi tidak efektif. Penyakit ini paling sering ditemui dalam praktik klinis dan berhubungan erat dengan meningkatnya risiko kejadian tromboemboli dan gagal jantung yang dapat meningkatkan angka kematian (Luo et al., 2025; Nesheiwat et al., 2025). Secara global, diperkirakan terdapat sekitar 59,7 juta penderita AF, dengan 4,72 juta kasus baru per tahun dan angka kematian mencapai sekitar 315 ribu pada tahun 2019 (Li et al., 2022). Prevalensi AF di kawasan Asia adalah sekitar 1% pada populasi dewasa, sedikit lebih rendah dibandingkan pada negara di wilayah barat. Namun demikian, karena besarnya jumlah penduduk, wilayah Asia menyumbang beban kasus AF yang sangat besar secara global (Tamirisa et al., 2021). Prevalensi AF di Indonesia terus meningkat, sekitar 3,2% dari populasi mengalami kondisi ini. Seiring dengan perubahan demografi dan gaya hidup, jumlah penderita AF di Indonesia diproyeksikan akan terus meningkat, bahkan diperkirakan dapat mencapai lebih dari 3 juta orang pada tahun 2050 (Heartology, 2024).

Penderita AF memiliki risiko sekitar 5 kali lipat lebih tinggi untuk mengalami stroke dibanding individu tanpa AF sehingga menimbulkan beban global yang besar apabila terjadi komplikasi tersebut akibat kurangnya deteksi serta tatalaksana yang adekuat (Tonko & Wright, 2021). Pada pasien AF simtomatik, khususnya yang berusia muda atau dengan episode paroksismal yang sering, strategi kontrol irama sering diutamakan. Terapi kontrol irama dapat dilakukan dengan obat antiaritmia atau dengan ablasi kateter. Saat ini, ablasi kateter merupakan salah satu modalitas terapi utama untuk AF dan telah terbukti lebih efektif daripada obat antiaritmia dalam mempertahankan irama sinus jangka panjang (Luo et al., 2025). Pendekatan ablasi konvensional yang paling banyak digunakan adalah ablasi termal dengan menggunakan energi panas (*radiofrequency ablation*, RFA) atau menggunakan pembekuan (*cryoballoon ablation*, CBA). Metode ini telah digunakan secara luas di dunia dan efektif mencapai keberhasilan *pulmonary vein isolation* (PVI) pada AF paroksismal dengan tingkat bebas aritmia yang tinggi dalam setahun, lebih tinggi dibandingkan terapi obat (Penela et al., 2024). Meskipun efektif, ablasi termal memiliki keterbatasan berupa risiko kerusakan kolateral pada jaringan di sekitar atrium yang ikut terpapar energi termal. Energi dari ablasi termal, terutama energi panas, dapat menyebabkan cedera pada struktur di luar jantung (Meng et al., 2025).

Risiko tersebut, meskipun jarang, dapat bersifat fatal sehingga menjadi perhatian utama dalam prosedur ablasi termal. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan baru yang lebih aman untuk ablasi AF, yang dapat meminimalisir kerusakan jaringan nontarget di sekitar atrium. Sejalan dengan kebutuhan akan metode ablasi yang lebih selektif, maka diperlukan suatu metode ablasi alternatif. Saat ini, terdapat metode ablasi nontermal yang baru dikembangkan, yaitu *pulsed field ablation* (PFA). PFA merupakan metode ablasi yang memanfaatkan medan listrik berdenyut tegangan tinggi (*pulsed electric field*) untuk menciptakan efek elektroporasi pada sel miokardium.

Dengan demikian, *Pulsed field ablation* (PFA) merupakan modalitas inovatif yang berpotensi menjadi terobosan dalam terapi ablasi AF secara global maupun nasional. Pendekatan ini berpeluang meningkatkan keberhasilan jangka panjang ablasi pada AF sekaligus menurunkan risiko komplikasi serius. Sampai saat ini, masih sedikit studi literatur yang membahas mengenai perbandingan antara PFA dengan ablasi termal dari sisi efikasi, keamanan, serta efisiensi penerapannya terhadap pasien AF sehingga topik ini sangat penting untuk diteliti. Oleh karena itu, tinjauan ini bertujuan untuk mengeksplorasi perbandingan antara PFA dan ablasi termal dalam penatalaksanaan AF dilihat dari efikasi, keamanan, yang meliputi komplikasi pasca-prosedur, dan efisiensi dari penerapannya.

METODE

Tinjauan literatur ini disusun dalam bentuk metode *narrative review* dengan tujuan untuk mengeksplorasi mekanisme PFA serta membandingkan efikasi, keamanan, dan efisiensi dari

PFA dibandingkan dengan ablasi termal pada pasien dengan AF. Studi ini melibatkan pencarian sistematis terhadap artikel ilmiah yang relevan dari 3 sumber *database* utama, yaitu PubMed, ScienceDirect, dan MDPI dengan fokus pada publikasi antara tahun 2020-2025. Pencarian ini menggunakan kombinasi kata kunci “*pulsed field ablation*”, “*thermal ablation*”, dan “*atrial fibrillation*”. Kualitas studi dinilai berdasarkan desain studi, metode pengambilan *sample*, dan kejelasan pelaporan *outcome*.

Pertanyaan penelitian dalam tinjauan literatur ini dirumuskan berdasarkan pendekatan PICO, dengan populasi (P) berupa pasien dengan AF paroksismal atau persisten, intervensi (I) berupa *pulsed field ablation* (PFA), dengan pembanding (C) berupa ablasi termal (*radiofrequency* atau *cryoablation*), dan hasil (O) berupa efikasi, keamanan, komplikasi pasca-prosedur, dan efisiensi. Kriteria inklusi yang ditetapkan adalah artikel berbahasa Inggris dengan akses penuh gratis, research paper, studi pada pasien AF, membandingkan penggunaan PFA dengan ablasi termal, dipublikasikan dalam periode waktu 2020-2025. Kriteria eksklusi yaitu studi pada pasien *atrial flutter*, *supraventricular tachycardia* (SVT), atau studi pada hewan coba.

HASIL

Berdasarkan hasil pencarian pada 3 sumber *database*, didapatkan 66 artikel dengan 2 artikel duplikat sehingga total artikel yang didapatkan adalah sebanyak 64. Penyaringan lebih lanjut dilakukan berdasarkan judul abstrak, dan sebanyak 59 artikel dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria inklusi. Sebanyak 5 artikel dianggap relevan dan dipilih untuk dibandingkan dan dianalisis dalam bentuk teks lengkap. Lima studi yang dikaji terdiri dari empat uji klinis *Randomized Controlled Trial* (RCT) serta satu studi observasional prospektif. Durasi *follow-up* terhadap pasien pada seluruh studi ini adalah 1 tahun.

Tabel 1. Karakteristik Artikel Terinklusi

No.	Pe.neliti	Desain studi	Populasi	Intervensi		Hasil*	Kesimpulan
				PFA	Ablasi Termal		
1.	Reddy et al. (2023) ADVENT Trial	RCT, <i>single-blind, non-inferiority trial</i>	607 Pasien AF paroksismal usia ≤75 tahun, simtomatik, gagal terapi obat	305 Pasien	302 Pasien	1. Efikasi • PFA 73.3% • Ablasi termal 71.3% • CI: -5.2-9.2, noninferior 2. Keamanan (<i>safety end point</i>) • PFA 2.1% • Ablasi termal 1.5% • CI: -1.5-2.8 noninferior 3. Komplikasi • PFA : Tamponade (2), SCL (3) • RFA/CBA : Stroke (1), cedera saraf frenikus (2) 4. Waktu prosedur • PFA 105.8±29.4 menit	PFA noninferior terhadap ablasi termal untuk efikasi dan keamanan; PFA memiliki waktu prosedur lebih cepat

							• Ablasi termal 123.1±42.1 menit	
2.	Reddy et al. (2024)	RCT, subanalisis ADVENT Trial (studi beban aritmia atrium berulang)	593 Pasien AF paroksismal simtomatik	299 Pasien	294 Pasien	1. 78.4% (465/593) mencapai beban residual <i>atrial arrhythmia</i> (AA)< 0.1%, menunjukkan peningkatan kualitas hidup (QoL) pasien 2. Peningkatan score AFEQT (<i>Atrial Fibrillation Effect on Quality-of-Life Questionnaire</i>) yang signifikan.	PFA menghasilkan <i>burden</i> AF lebih rendah dan lebih banyak pasien bebas aritmia dibanding ablasi termal sehingga meningkatkan kualitas hidup pasien	
3.	Patel et al. (2024)	RCT, subanalisis ADVENT Trial (studi MRI otak)	71 Pasien AF paroksismal, MRI otak pasca ablasi	34 Pasien	37 Pasien	Temuan gambaran SCL pada hasil MRI: • PFA 8.8% • Ablasi termal 0% • P=0.10; tidak signifikan. Tidak ada defisit neurologis saat pasien dipulangkan maupun setelah 90 hari.	Tidak ditemukan dampak klinis neurologis jangka pendek antara PFA dan termal	
4.	Reichlin et al. (2025)	RCT, <i>multicenter, blinded endpoint adjudication</i>	210 Pasien AF paroksismal simtomatik, tidak respons terhadap obat anti-aritmia	105 Pasien	105 Pasien	1. Efikasi • PFA: 62.9% • CBA: 49.3% • p=<0,001 untuk uji non-inferior, dan p=0.046 untuk uji superior 2. Keamanan (<i>safety end point</i>) • PFA: 1% • CBA: 1.9%; tidak berbeda signifikan 3. Komplikasi • PFA : stroke (1%) • Ablasi termal : tamponade jantung (1,9%) • Tidak ditemukan komplikasi yang berhubungan dengan energi ablasi pada pasien yang menjalani PFA 4. Waktu prosedur • PFA: 54.8 menit • CBA: 73.2 menit	PFA memiliki efikasi lebih baik dan durasi prosedur lebih singkat dibanding CBA, dengan profil keamanan setara	

5.	Kueffer et al. (2024)	Prospektif, non-randomized, single-center observational study	533 Pasien dengan AF persisten yang menjalani ablasi pertama	214 Pasien	190 Pasien CBA, 129 Pasien RFA	1. Efikasi: • PFA 55.3% • RFA 48.3% • CBA 62.1% Perbandingan • PFA vs RFA: P=.010 • PFA vs CBA: P=.790 • CBA vs RFA: P=.009 2. Keamanan (<i>safety end point</i>): • PFA: 2.3% • CBA: 2.6% • RFA: 0.8% (P = 0.545) 3. Komplikasi: • Tamponade: 2 pasien PFA (1,6%) • Paresis saraf frenikus: 5 pasien CBA (2,6%) • Komplikasi vaskular: 3 pasien PFA, 1 pasien RFA • Tidak ada komplikasi neurologis atau esofagus pada PFA 4. Waktu prosedur: • PFA: 60 menit • CBA: 84 menit • RFA: 171 menit	PFA dan CBA lebih efektif dibanding RFA untuk persisten AF; profil keamanan setara; PFA memiliki waktu prosedur lebih cepat
----	-----------------------	---	--	------------	--------------------------------	---	---

Keterangan: RCT, *Randomized Controlled Trial*; AF, *Atrial Fibrillation*; PFA, *Pulsed Field Ablation*; RFA, *Radiofrequency Ablation*; CBA, *Cryoballoon Ablation*, SCL, *Silent Cerebral Lesion*; QoL, *Quality of Life*; *hasil dianggap signifikan pada p<0.05.

PEMBAHASAN

Fibrilasi atrium (AF) adalah suatu takiaritmia supraventrikular yang ditandai oleh aktivitas listrik atrium yang menyebar secara tidak terkoordinasi sehingga irama denyut jantung menjadi *irregularly-irregular* dan cepat. Secara elektrofisiologis, gelombang listrik atrium pada AF berfrekuensi tinggi dan tidak selaras, mengakibatkan hilangnya kontraksi atrium yang efektif. AF dapat bersifat paroksismal ataupun persisten tergantung durasi dan respons terhadap terapi (Joglar et al., 2024; Kurbaini et al., 2024). Mekanisme dasar AF meliputi *focal triggers* dan *reentry*. AF paroksismal umumnya dipicu oleh adanya fokus ektopik dengan *firing rate* cepat yang paling sering berasal dari area vena pulmonalis di atrium kiri. Pada AF persisten, mekanisme pemicu dan *sustaining* lebih kompleks, bahkan satu kali isolasi vena pulmonalis (*Pulmonary Vein Isolation*, PVI) seringkali tidak cukup dalam mengatasi AF persisten sehingga diperlukan target ablasi tambahan untuk memutus sirkuit *reentry* yang lebih luas (Jiang et al., 2024). Selain itu, remodeling atrium juga dapat menjadi salah satu penyebab AF. Kondisi seperti hipertensi, penyakit katup jantung, atau kondisi lain yang menyebabkan bertambahnya beban atrium dapat menyebabkan dilatasi atrium dan kardiomiopati atrium yang memicu perubahan struktural serta elektrik (konduktivitas menjadi tidak homogen) sehingga atrium rentan mengalami fibrilasi (Kurbaini et al., 2024). Kelainan ini dapat menimbulkan berbagai komplikasi seperti stroke iskemik ataupun tromboemboli sistemik akibat trombus

(emboli) yang terbentuk di atrium fibrilasi akibat aliran darah yang stasis. Selain itu, disfungsi hemodinamik akibat denyut jantung yang tidak terkontrol dapat menyebabkan gagal jantung (Tonko & Wright, 2021).

Ablasi kateter telah menjadi modalitas utama tatalaksana AF terutama pada pasien yang simptomatik atau gagal dengan terapi obat (Jiang et al., 2024). Meskipun efektif mengurangi gejala dan beban AF, ablasi kateter konvensional memiliki keterbatasan dan risiko. Lesi ablasi termal dari RFA ataupun CBA dapat merusak struktur di sekitar atrium. Energi termal dari ablasi dapat menjalar ke esofagus sehingga berisiko menyebabkan fistula atrio-esofageal yang jarang namun fatal, atau mengenai nervus frenikus sehingga menyebabkan kelumpuhan diafragma, stenosis vena pulmonalis akibat luka sikatrik pada ostium vena pulmonalis, tamponade jantung akibat perforasi, ataupun stroke emboli (Chaumont et al., 2024; Meng et al., 2025; Neale, 2024). Oleh karena itu, inovasi teknik ablasi yang lebih aman dan selektif terus dikembangkan. Salah satu teknologi terbaru tersebut adalah *Pulsed field ablation* sebagai generasi baru ablasi pada AF.

Pulsed field ablation (PFA) adalah teknologi ablasi kateter terbaru yang menggunakan energi medan listrik berdenyut untuk menciptakan lesi ablasi melalui mekanisme elektroporasi sel miokard. Berbeda dari ablasi RFA/CBA yang bersifat termal, PFA bersifat nontermal. Arus listrik tegangan tinggi diberikan dalam *pulse* yang sangat singkat (mikro- hingga nano-detik) ke jaringan target, menyebabkan terbentuknya pori pada membran sel (elektroporasi) dan peningkatan permeabilitas membran. Jika stimulus cukup kuat dan durasi cukup, elektroporasi menjadi *irreversible* (*Irreversible Electroporation*, IRE) sehingga sel mengalami kehilangan homeostasis dan mengalami apoptosis. IRE inilah yang merupakan mekanisme ablasi PFA, yaitu apoptosis selektif pada kardiomyosit di area target (Jiang et al., 2024; Maurhofer et al., 2024). Berdasarkan hasil ekstraksi 5 studi yang membandingkan PFA dengan ablasi termal didapatkan hasil yang beragam terkait efikasi, keamanan, efisiensi, dan komplikasi pasca-prosedur dari kedua metode tersebut.

Efikasi PFA Dibandingkan Ablasi Termal

Tiga dari lima studi mengevaluasi efikasi prosedur ablasi berdasarkan angka bebas kekambuhan AF pasca tindakan. Studi oleh Reddy et al. (2023) melaporkan bahwa PFA memberikan angka bebas AF sebesar 73,3% dibandingkan 71,3% pada ablasi termal, menunjukkan hasil yang noninferior secara statistik. Sementara itu, Reichlin et al. (2025) mengungkapkan bahwa PFA menghasilkan tingkat bebas kekambuhan sebesar 62,9% dibandingkan 49,3% pada CBA ($p < 0,001$ untuk uji non-inferioritas, dan $p = 0,046$ untuk uji superioritas), menegaskan keunggulan efikasi PFA terhadap ablasi. Studi oleh Kueffer et al. (2024) juga memperlihatkan keunggulan signifikan PFA (55,3%) dibandingkan RFA (48,3%) dengan $p = 0,010$, di mana RFA mencatat hasil terendah dibandingkan dengan PFA dan CBA. Reddy et al. (2024) melaporkan bahwa sebanyak 78,4% pasien mencapai beban residual aritmia atrium (AA) $< 0,1\%$, disertai peningkatan skor AFEQT (*Atrial Fibrillation Effect on Quality-of-Life Questionnaire*) yang signifikan, menandakan adanya peningkatan kualitas hidup. Dengan demikian, data tersebut menegaskan bahwa PFA secara konsisten memberikan hasil efikasi yang noninferior hingga superior dibandingkan ablasi termal, baik pada pasien dengan AF paroksismal maupun pada kasus AF persisten.

Keamanan PFA Dibandingkan Ablasi Termal

Dari sisi keamanan, beberapa studi menegaskan bahwa PFA memiliki profil keamanan yang baik dan cenderung lebih unggul dibandingkan ablasi termal, terutama dalam mencegah komplikasi serius. Pada studi Reddy et al. (2023), komplikasi berupa stroke dan cedera saraf frenikus ditemukan pada kelompok RFA/CBA, sementara tidak terjadi pada kelompok PFA. Studi oleh Reichlin et al. (2025) melaporkan bahwa terdapat komplikasi stroke tercatat sebesar

1% pasien pada PFA, sedangkan pada kelompok ablasi termal terdapat komplikasi tamponade jantung mencapai 1,9% pasien. Meskipun begitu, tidak ditemukan komplikasi yang berhubungan langsung dengan energi ablasi pada pasien yang menjalani prosedur PFA, seperti stenosis vena pulmonalis, paralisis nervus frenikus, ataupun fistula atrioesofageal. Studi oleh Kueffer et al. (2024) melaporkan adanya temuan paresis saraf frenikus pada kelompok CBA yang tidak ditemukan pada kelompok PFA. Meskipun demikian, didapatkan komplikasi tamponade pada kelompok PFA dalam studi Reddy et al. (2023) dan Kueffer et al. (2024) sehingga efek samping dari PFA masih perlu diteliti lebih lanjut. Selain itu, sebagian besar studi yang dianalisis masih memiliki keterbatasan dalam hal durasi *follow-up*, sehingga keamanan jangka panjang dari PFA masih perlu dikaji lebih lanjut.

Efisiensi PFA Dibandingkan Ablasi Termal

Dari segi efisiensi, prosedur PFA menunjukkan keunggulan yang konsisten dibandingkan ablasi termal dalam hal durasi waktu tindakan. Studi Reddy et al. (2023) melaporkan bahwa rata-rata waktu prosedur PFA hanya 105,8 menit, lebih singkat dibandingkan pada kelompok ablasi termal dengan waktu 123,1 menit. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Reichlin et al. (2025), di mana durasi PFA tercatat 54,8 menit, jauh lebih efisien dibandingkan CBA yang memakan waktu 73,2 menit. Studi Kueffer et al. (2024) memperkuat tren ini dengan mencatat rata-rata durasi PFA hanya 60 menit, sementara CBA memerlukan 84 menit dan RFA bahkan hingga 171 menit. Efisiensi waktu ini menjadi keuntungan penting secara klinis dan logistik, karena prosedur yang lebih singkat dapat mengurangi durasi paparan anestesi bagi pasien, memungkinkan peningkatan *turnover* ruang kateterisasi, efisien terhadap sumber daya manusia, serta menurunkan beban biaya operasional. Dengan demikian, selain dari sisi efikasi dan keamanan, PFA juga menawarkan keunggulan operasional (Calvert et al., 2024).

Dampak Neurologis PFA Dibandingkan Ablasi Termal

Dari aspek neurologis, studi oleh Patel et al. (2024) memberikan gambaran awal mengenai potensi dampak subklinis dari prosedur ablasi terhadap sistem saraf pusat, khususnya melalui evaluasi *silent cerebral lesion* (SCL) menggunakan MRI otak pasca tindakan. Dalam studi ini, angka SCL tercatat sebesar 8,8% (3 pasien) pada kelompok PFA, sementara tidak ditemukan pada kelompok ablasi termal, perbedaan tersebut tidak signifikan secara statistik ($p=0,10$). Tidak ada dari pasien-pasien dengan kelainan yang terdeteksi pada MRI tersebut yang memiliki temuan neurologis akut maupun jangka panjang. Temuan neurologis untuk ketiga pasien tersebut normal pada penilaian sebelum keluar rumah sakit dan pada hari ke-90, dengan skor mRS dan *National Institutes of Health Stroke Scale* sebesar 0 pada setiap titik waktu. Tidak ada kejadian keamanan serius lainnya yang dicatat pada ketiga pasien ini. Meskipun secara umum PFA dianggap aman secara neurologis, dibutuhkan studi lanjutan dengan jumlah sampel lebih besar dan durasi *follow-up* lebih panjang untuk memastikan apakah temuan ini bersifat transien atau memiliki dampak neurologis jangka panjang.

Tabel 2. Perbedaan Karakteristik Metode Ablasi.

Metode Ablasi	Sumber Energi	Karakteristik
<i>Radiofrequency ablation</i> (RFA)	Energi panas yang dihasilkan menggunakan energi listrik bertegangan rendah dan frekuensi tinggi.	Efisiensi ablasi titik rendah dan kurva pembelajaran panjang bagi operator.
<i>Cryoballoon ablation</i> (CBA)	Refrigeran cair di dalam lapisan balon.	Efek ablasi masih tergantung pada posisi balon dan tidak selektif terhadap jaringan.
<i>Pulsed field ablation</i> (PFA)	Pulse elektroda dengan tegangan tinggi dan frekuensi tinggi menghasilkan energi nontermal.	Energi nontermal, selektivitas jaringan tinggi, tidak merusak jaringan sekitarnya.

Keterangan: diadaptasi dari studi Wang et al. (2024)

Studi yang telah ditinjau menunjukkan bahwa PFA merupakan teknologi yang menjanjikan, dengan efikasi tinggi, keamanan yang unggul, efek samping yang minimal, dan durasi prosedur yang lebih singkat. Dengan semua kelebihan tersebut, PFA berpotensi menggantikan ablasi termal sebagai terapi utama untuk pasien AF yang simptomatik atau gagal terapi obat, meskipun penelitian lanjutan masih diperlukan untuk mengevaluasi manfaatnya pada populasi dengan AF persisten dan komplikasi jangka panjang. Studi ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Jangka waktu follow-up pasien masih terbatas hingga 12 bulan sehingga komplikasi jangka panjang belum dapat dinilai pada studi ini. Selain itu, jumlah studi yang ditinjau pada review ini masih terbatas, sehingga mendorong diperlukan adanya penelitian-penelitian terbaru terkait topik ini. Selain itu, studi ini masih menggunakan metode *narrative review* sehingga membatasi kemampuan untuk menggeneralisasi temuan pada studi ini. Oleh karena itu, diperlukan adanya studi yang serupa dengan menggunakan metode *systematic review-meta analysis* dengan studi yang lebih banyak, subjek yang lebih banyak, dan waktu *follow-up* lebih panjang untuk memperkuat temuan pada studi ini.

PFA berpotensi untuk diterapkan lebih luas lagi secara global, khususnya di Indonesia. PFA memiliki potensi efisiensi biaya jangka panjang. Meskipun biaya awal untuk alat dan operasional PFA tergolong tinggi, dalam jangka panjang PFA berpotensi mengurangi ablasi ulang dan komplikasi, sehingga dalam jangka panjang bisa menekan beban biaya pada sistem seperti BPJS.

KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan berbagai studi terkini, PFA memiliki potensi sebagai alternatif yang efektif dan aman untuk penatalaksanaan AF. Dibandingkan dengan ablasi termal konvensional, PFA menunjukkan efikasi yang sebanding atau lebih baik, waktu prosedur yang lebih singkat, serta risiko komplikasi yang lebih rendah, khususnya kerusakan pada struktur non-target. Meskipun hasil awal ini menjanjikan, masih terdapat keterbatasan dalam hal data jangka panjang, efektivitas pada pasien dengan komorbiditas kompleks, serta penerapannya di negara berkembang. Dengan demikian, diperlukan studi lebih lanjut yang mencakup populasi yang lebih luas dan tindak lanjut dengan durasi yang lebih panjang untuk mengukuhkan posisi PFA dalam praktik klinis sehari-hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Fakultas Kedokteran Universitas Lampung yang telah mendukung penelitian ini, serta dosen pembimbing yang telah membimbing serta memberi masukan berupa kritik dan saran dalam penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Calvert, P., Mills, M. T., Xydis, P., Essa, H., Ding, W. Y., Koniari, I., Farinha, J. M., Harding, M., Mahida, S., Snowden, R., Waktare, J., Borbas, Z., Modi, S., Todd, D., Ashrafi, R., Luther, V., & Gupta, D. (2024). *Cost, efficiency, and outcomes of pulsed field ablation vs thermal ablation for atrial fibrillation: A real-world study*. *Heart Rhythm*, 21(9), 1537–1544. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2024.05.032>
- Chaumont, C., McDonnell, E., Boveda, S., Savoure, A., Rollin, A., Combes, S., Al Hamoud, R., Mandel, F., Zerrouh, S., Eltchaninoff, H., Maury, P., & Anselme, F. (2024). *Prospective 1-year results of atrial fibrillation ablation using the pentaspline pulsed field ablation catheter: The initial French experience*. *Archives of Cardiovascular Diseases*, 117(4), 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2024.01.005>

- Ekanem, E., Neuzil, P., Reichlin, T., Kautzner, J., van der Voort, P., Jais, P., Chierchia, G.-B., Bulava, A., Blaauw, Y., Skala, T., Fiala, M., Duytschaever, M., Szeplaki, G., Schmidt, B., Massoullie, G., Neven, K., Thomas, O., Vijgen, J., Gandjbakhch, E., ... Reddy, V. Y. (2024). *Safety of pulsed field ablation in more than 17,000 patients with atrial fibrillation in the MANIFEST-17K study*. *Nature Medicine*, 30(7), 2020–2029. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03114-3>
- Heartology. (2024, December 10). *Fibrilasi Atrium: Gejala, Penyebab, Faktor Risiko, dan Pengobatannya*.
- Jiang, S., Qian, F., Ji, S., Li, L., Liu, Q., Zhou, S., & Xiao, Y. (2024). Pulsed field ablation for Atrial Fibrillation: Mechanisms, Advantages, and Limitations. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 25(4). <https://doi.org/10.31083/j.rcm2504138>
- Joglar, J. A., Chung, M. K., Armbruster, A. L., Benjamin, E. J., Chyou, J. Y., Cronin, E. M., Deswal, A., Eckhardt, L. L., Goldberger, Z. D., Gopinathannair, R., Gorenek, B., Hess, P. L., Hlatky, M., Hogan, G., Ibeh, C., Indik, J. H., Kido, K., Kusumoto, F., Link, M. S., ... Van Wagoner, D. R. (2024). *2023 ACC/AHA/ACCP/HRS Guideline for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines*. *Circulation*, 149(1). <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000001193>
- Kueffer, T., Stettler, R., Maurhofer, J., Madaffari, A., Stefanova, A., Iqbal, S. ur R., Thalmann, G., Kozhuharov, N. A., Galuszka, O., Servatius, H., Haeberlin, A., Noti, F., Tanner, H., Roten, L., & Reichlin, T. (2024). *Pulsed-field vs cryoballoon vs radiofrequency ablation: Outcomes after pulmonary vein isolation in patients with persistent atrial fibrillation*. *Heart Rhythm*, 21(8), 1227–1235. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2024.04.045>
- Kurbaini, F. T., Hairrudin, & Wulandari, P. (2024). Analisis Faktor Risiko Kejadian Atrial Fibrilasi pada Pasien Mitral Stenosis di RSD Dr. Soebandi Jember. *Jurnal Kesehatan Kusuma Husada Universitas Kusuma Husada Surakarta*, 15(2), 44–52.
- Li, H., Song, X., Liang, Y., Bai, X., Liu-Huo, W.-S., Tang, C., Chen, W., & Zhao, L. (2022). *Global, regional, and national burden of disease study of atrial fibrillation/flutter, 1990–2019: results from a global burden of disease study, 2019*. *BMC Public Health*, 22(1), 2015. <https://doi.org/10.1186/s12889-022-14403-2>
- Luo, Q., Li, X., Xie, Y., Bao, Y., Wei, Y., Lin, C., Liu, Z., Zhang, N., Ling, T., Chen, K., Pan, W., Wu, L., & Jin, Q. (2025). *Long-term outcomes of cryoballoon versus robotic magnetic navigation guided radiofrequency ablation in patients with persistent atrial fibrillation*. *Scientific Reports*, 15(1), 6181. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90920-5>
- Maurhofer, J., Tanner, H., Kueffer, T., Madaffari, A., Thalmann, G., Kozhuharov, N., Galuszka, O., Servatius, H., Haeberlin, A., Noti, F., Roten, L., & Reichlin, T. (2024). *Pulsed-field ablation for repeat procedures after failed prior thermal ablation for atrial fibrillation*. *Heart Rhythm* O2, 5(5), 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.hroo.2024.03.012>
- Meng, F., Jin, S., & Liu, N. (2025). *Cardiac selectivity in pulsed field ablation*. *Current Opinion in Cardiology*, 40(1), 37–41. <https://doi.org/10.1097/HCO.0000000000001183>
- Neale, T. (2024). *The Promise of Pulsed-Field Ablation: Cautious Optimism Amid Some Unknowns*. *TctMD*.
- Nesheiwat, Z., Goyal, A., & Jagtap, M. (2025, January). *Atrial Fibrillation. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing*.
- Patel, C., Gerstenfeld, E. P., Gupta, S. K., Winterfield, J., Woods, C., Natale, A., Schneider, C. W., Achyutha, A. B., Holland, S. K., Richards, E., Albrecht, E. M., Lehmann, J. W., Mansour, M., & Reddy, V. Y. (2024). *Comparison of cerebral safety after atrial fibrillation using pulsed field and thermal ablation: Results of the neurological*

- assessment subgroup in the ADVENT trial. *Heart Rhythm*, 21(11), 2103–2109. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2024.05.048>
- Penela, D., Falasconi, G., & Zucchelli, G. (2024). Transcatheter options for atrial fibrillation treatment: an overview of the ablative techniques currently available and future perspectives. *Annals of Cardiothoracic Surgery*, 13(1), 31–43. <https://doi.org/10.21037/acs-2023-afm-0060>
- Reddy, V. Y., Gerstenfeld, E. P., Natale, A., Whang, W., Cuoco, F. A., Patel, C., Mountantonakis, S. E., Gibson, D. N., Harding, J. D., Ellis, C. R., Ellenbogen, K. A., DeLurgio, D. B., Osorio, J., Achyutha, A. B., Schneider, C. W., Mugglin, A. S., Albrecht, E. M., Stein, K. M., Lehmann, J. W., & Mansour, M. (2023). Pulsed Field or Conventional Thermal Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. *New England Journal of Medicine*, 389(18), 1660–1671. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2307291>
- Reddy, V. Y., Mansour, M., Calkins, H., d'Avila, A., Chinitz, L., Woods, C., Gupta, S. K., Kim, J., Eldadah, Z. A., Pickett, R. A., Winterfield, J., Su, W. W., Waks, J. W., Schneider, C. W., Richards, E., Albrecht, E. M., Sutton, B. S., Gerstenfeld, E. P., Whang, W., ... Kumar, K. (2024). Pulsed Field vs Conventional Thermal Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. *Journal of the American College of Cardiology*, 84(1), 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2024.05.001>
- Reichlin, T., Kueffer, T., Badertscher, P., Jüni, P., Knecht, S., Thalmann, G., Kozhuharov, N., Krisai, P., Jufer, C., Maurhofer, J., Heg, D., Pereira, T. V., Mahfoud, F., Servatius, H., Tanner, H., Kühne, M., Roten, L., & Sticherling, C. (2025). Pulsed Field or Cryoballoon Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. *New England Journal of Medicine*, 392(15), 1497–1507. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2502280>
- Tamirisa, K. P., Al-Khatib, S. M., Mohanty, S., Han, J. K., Natale, A., Gupta, D., Russo, A. M., Al-Ahmad, A., Gillis, A. M., & Thomas, K. L. (2021). Racial and Ethnic Differences in the Management of Atrial Fibrillation. *CJC Open*, 3(12), S137–S148. <https://doi.org/10.1016/j.cjco.2021.09.004>
- Tonko, J. B., & Wright, M. J. (2021). Review of the 2020 ESC Guidelines for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation—What Has Changed and How Does This Affect Daily Practice. *Journal of Clinical Medicine*, 10(17), 3922. <https://doi.org/10.3390/jcm10173922>
- Wang, Z., Liang, M., Sun, J., Zhang, J., & Han, Y. (2024). A New Hope for the Treatment of atrial Fibrillation: Application of Pulsed-Field Ablation Technology. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, 11(6), 175. <https://doi.org/10.3390/jcdd11060175>